

DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2023.05.24.01

文章编号: 1674-5086(2025)03-0076-12

中图分类号: TE19

文献标志码: A

塔西南山前带的地震波场正演模拟分析

裴广平^{1*}, 沈天晶², 彭更新¹, 姜泽磊², 陈飞旭¹

1. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000

2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500

摘要: 塔里木盆地西南山前带地区的地表、地下构造模式复杂, 构造岩性多变, 属典型的“地表地下双复杂”区域, 地震波场复杂, 处理与成像难度大, 精度低。为厘清该地区的地震波场传播规律, 为后续资料处理提供理论基础, 以实际地震资料、测井数据以及近地表露头数据为基础, 建立了代表该地区地质特征的双复杂速度模型, 并进行地震波场模拟分析。首先, 利用近地表层析数据与高程建立了近地表速度模型; 其次, 以地震解释数据为基础, 对复杂构造模型进行模式化调整; 最后, 将近地表速度模型与构造模型进行融合完成速度结构建模。为更好地建立符合目标工区实际 Q 值分布, 总结了一套基于稀疏井数据的 Q 模型建立方法。通过对上述方法建立的速度模型与 Q 模型进行地震波场正演模拟, 分析了地表高程起伏、近地表速度分布等因素对地下地震波场的影响。上述研究可为研究区的地震采集观测系统参数优化、提高地震成像质量建立理论基础。

关键词: 三维地质建模; 起伏地表; 数值模拟; 数值频散; 黏声波正演

Seismic Wavefield Forward Modeling Study Under Complex Conditions in the Southwest Foreland Belt of the Tarim Basin

PEI Guangping^{1*}, SHEN Tianjing², PENG Gengxin¹, JIANG Zelei², CHEN Feixu¹

1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Branch Company, Korla, Xinjiang 841000, China

2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: The surface and subsurface structural patterns in the region in front of the southwest foothill area of the Tarim Basin are highly complex, with diverse lithological and structural features. This area is a typical case of “dual complexity” in both surface and subsurface geology, leading to complex seismic wavefields and significant challenges in data processing and imaging accuracy. To clarify the seismic wavefield propagation characteristics in this region and provide a theoretical basis for subsequent data processing, this study constructs a dual-complexity velocity model representative of the area’s geological features, based on field seismic data, well logging data, and near-surface outcrop information, and conducts seismic wavefield simulation analysis. During the modeling process, a near-surface velocity model was first developed using near-surface tomography data and elevation information. Then, a structurally complex model was constructed and refined based on seismic interpretation results. These models were subsequently integrated to form the final velocity structure model. To accurately characterize the Q value distribution within the target area, this study proposes a method for constructing a Q model based on sparse well data. Seismic wavefield forward modeling was conducted using the developed velocity and Q models to analyze the effects of surface elevation variation and near-surface velocity distribution on the subsurface wavefield. The findings are expected to provide a theoretical basis for optimizing seismic acquisition system parameters and improving seismic imaging quality in the study area.

Keywords: 3D geological modeling; rolling surface; numerical simulation; numerical dispersion; visco-acoustic wave modeling

网络出版地址: <http://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20250613.1004.004>

裴广平, 沈天晶, 彭更新, 等. 塔西南山前带的地震波场正演模拟分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 76-87.

PEI Guangping, SHEN Tianjing, PENG Gengxin, et al. Seismic Wavefield Forward Modeling Study Under Complex Conditions in the Southwest Foreland Belt of the Tarim Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(3): 76-87.

* 收稿日期: 2023-05-24 网络出版时间: 2025-06-13

通信作者: 裴广平, E-mail: peigp-tlm@petrochina.com.cn

引言

双复杂区域是指地表高差大、起伏剧烈,地下高陡构造、岩性复杂的地区,此类地区在中国西部和南方的勘探项目中占比越来越高。该类区域内地震采集环境复杂,地下波场传播杂乱,给数据处理带来了极大的困难,为此针对双复杂区域的地震资料采集与处理是近年来油气勘探的重点和难点。

以塔里木盆地西南山前带地区(简称塔西南地区)为例,该区地表高程起伏大,近地表风化严重,覆盖巨厚黄土层,横向厚度分布不均,地震波衰减不均匀,且存在浅层高速砾岩形成的速度倒转界面,屏蔽效应明显(图1);地下构造模式复杂,浅层高陡,断层发育,且目的层构造岩性多变。上述问题给地震成像带来了极大困难,导致该区地震资料成像质量差且精度低。迄今为止,二维、三维勘探都无法明确标定地下结构特征,成为该区油气勘探开发的瓶颈。分析影响数据处理及成像质量的原因,是因为双复杂区域波场复杂,传播机理不清,因此在这类地质条件下的波场模拟分析具有重要意义,也是近年来中国地球物理学家研究的热点。薛昭等将间断 Galerkin 有限元数值模拟方法利用到起伏地表的正演中,该方法具有很高的精度,但计算量过大^[1];于明浩等利用波场照明,分析了相控震源在起伏地表下的传播路径与波场强度^[2];和芬芬等在复杂山地利用三维波动方程进行正演,分析了在起伏地表与断层的不同位置激发对波场的影响^[3]。

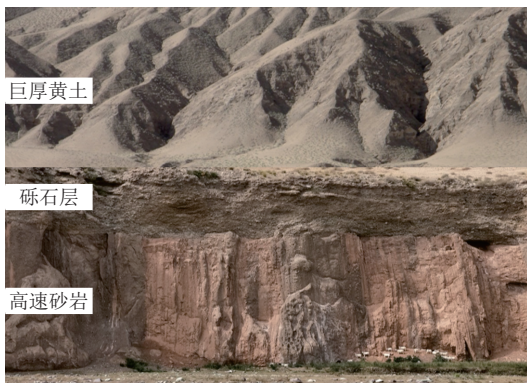


图1 近地表“三明治”结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the near-surface “sandwich” structure

双复杂区域波场分析关键在于建立基于该区域地质特征的地质模型,再进行精确的波场正演模拟。本文在前人研究的基础上,以塔西南地区实际地震资料为背景^[4-10],充分分析测井资料、岩石物

理、地质认识等成果,获得准确的模型参数,填充地质模型参数,建立复杂近地表模型和复杂中深层构造模型,开展地震波动方程数值模拟技术研究,并结合相应的正演算法需求,网格化形成最终的地质模型。采用基于黏声波方程的数值模拟方法获取正演模拟数据,形成一套完整的地球物理数据体,并在此基础上完成复杂地表对地震波场的影响分析,以期对塔西南地区的地震采集处理形成指导性意见。

1 建立近地表和中深层模型

首先,对塔西南地区野外出露的岩石,运用近地表层析速度构建近地表速度模型,为更好地反映该区浅层岩性的特征,在近地表速度模型中嵌入横向变化的高速砾石层。其次,以实际地震资料为背景,利用属性提取、断层解释等技术对地震资料进行处理,构建符合实际地质结构的白垩系下伏推覆构造与侏罗系横向岩性变化模型。最后,将二者进行融合,形成用于波动方程正演模拟的速度模型。结合地质解释成果,采用塔西南地区的储层层位和断层数据,建立地质构造格架模型,构建整体的黏弹性参数数值模型,根据正演模拟采集参数来修正关键模型参数。

1.1 近地表模型建立

近地表速度模型必须反映塔西南地区的典型近地表地质特征,包括起伏地表、低速黄土层与浅层高速砾岩等。由于实际地震数据品质差,近地表地震成像困难,缺乏地震层位、断层等信息以构建地质构造格架并填充速度场。本研究的近地表速度模型是以该工区的三维层析速度模型为基础而建立的。速度模型是基于数据驱动的层析反演方法构建,能准确表征塔西南黄土近地表的平滑速度变化。然而,由于层析速度模型较平滑,且初至走时层析成像无法反演高速砾岩导致的速度倒转界面(高速体位于低速体之上),因而原始的层析速度模型中缺失塔西南典型的浅层高速砾石层(图1)。因此,需要在层析速度模型中嵌入符合塔西南地区地质规律的近地表高速砾石层。

本研究基于地质露头、重磁勘探数据、垂直地震剖面(Vertical Seismic Profiling, VSP)考核炮速度等得到高速砾石层的空间展布信息^[11-13],在近地表

层析速度模型中考虑高速砾石层。其空间展布主要参考了局部的 VSP 考核炮速度剖面 and 冲积扇区域的砾石堆积模式。图 2 展示了位于塔西南地区内两口示例井的 VSP 考核炮速度剖面。砾石层的纵波速度约为 4 000 m/s。区域 A 的砾石层较薄,因此在速度模型中表现为层状高速体,且呈现横向尖灭变化现象;区域 B 位于山前带的冲积扇区域,砾石层

较厚(约 900 m),考虑到冲积扇的堆积模式为碗状形态^[14-15],本研究在区域 B 嵌入碗状砾石结构体。

由于高速砾石层与近地表低速黄土层之间的巨大波阻抗,并且黄土中含有大量的不规则散射体,导致近地表屏蔽效应明显,多次散射波场复杂。该近地表模型包含了高速砾石层,其横向空间展布变化能为相关的波场响应研究提供对比分析。

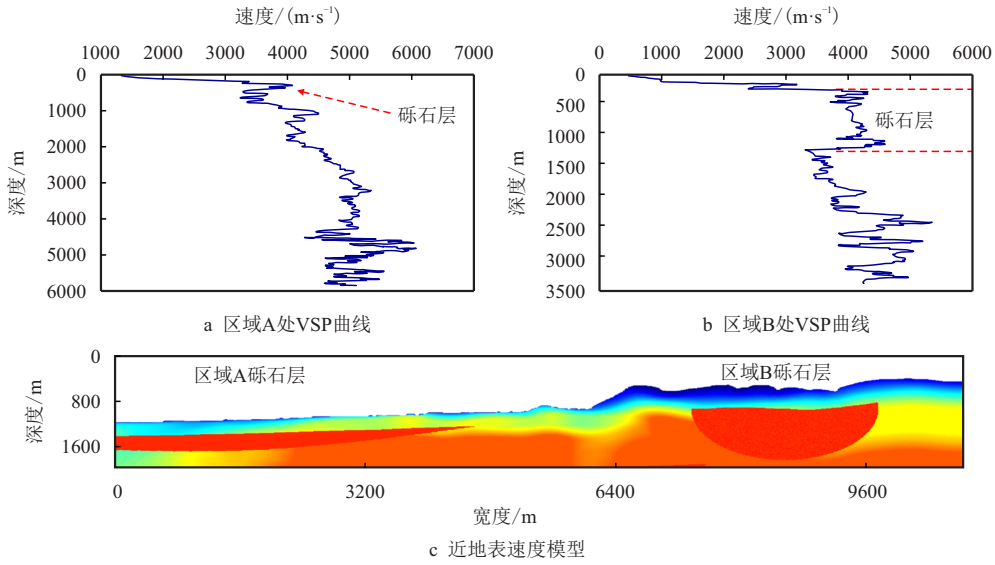


图 2 塔西南地区 VSP 曲线与含砾岩近地表速度模型对比

Fig. 2 Comparison between VSP check shot velocity profile and near-surface velocity model of gravel layer of a work area in southwest Tarim

1.2 中深层模型建立

基于塔西南地区现有的地震解释资料,整合区域地质背景、钻井数据及测井资料^[16-21],通过整合高精度断层解释成果(包括断层几何形态、断距分布及组合关系),构建了融合多尺度构造要素的综合构造模型(图 3)。

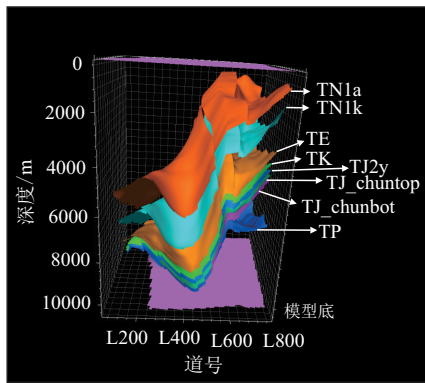


图 3 综合构造模型

Fig. 3 Integrated structural model

该模型精细表征了研究区断裂系统与地层结构的空配置关系,完整揭示了主要地层界面与断裂

体系的耦合特征。图中标注为地震解释层位代号。结合测井数据和实际地震剖面偏移速度模型,在综合构造模型中填充速度场信息,即可建立深度域构造速度模型。

1.3 近地表模型与中深层模型的融合

在建立了代表塔西南地质特征的近地表速度模型和中深层速度模型之后,需要将二者进行融合,形成用于波动方程正演模拟的速度模型。通常基于缝合界面的平滑处理无法完全消除界面附近速度值的巨大变化,会在速度模型中残留不符合地质规律的速度界面^[22]。因此,本研究基于平滑的地表高程界面,设置近地表速度模型和中深层速度模型的融合区。在该融合区内,以近地表模型下边界的速度与中深层模型上边界的速度作为该区速度值域,并在值域内进行线性插值,实现融合区内速度随着深度的逐渐变化,从而完全消除浅层—深层模型对融合界面影响。

基于该方法模拟得到的融合速度模型如图 4 所示,该模型完整表征了工区如下地质特征: 1) 模

型浅部精细刻画了横向非均质性砾岩体与低速黄土层; 2) 模型深层构造复杂, 断层发育, 反映了目

标工区的地质特点。模型的深度为 6 400 m, 范围为 10 330 m×9 910 m。

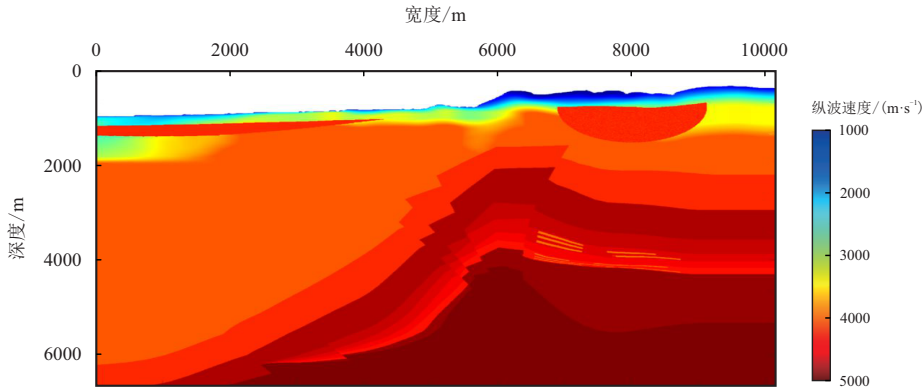


图 4 近地表速度模型与中深层速度模型的融合结果

Fig. 4 The fusion results of near-surface velocity model and mid-deep velocity model

2 黏声波方程正演

2.1 黏声波方程原理

黏弹性介质的性质介于完全弹性介质与完全黏性介质之间, 其表述主要为 Maxwell 与 Kelvin 模型。Kelvin 模型更倾向于弹性体, 控制方程简单, 因此成为地震勘探中黏声波方程推导的基础。在弹性本构方程中引入黏滞项, 可得到二阶的黏声波方程

$$\frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \left[1 + \frac{1}{\omega Q(\omega)} \frac{\partial}{\partial t} \right] \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中:

- v_p —纵波速度, m/s;
- U —传播波场, J;
- t —时间, s;
- ω —角频率, rad/s;
- Q —品质因子, 无量纲;
- x, y, z —笛卡尔坐标系的方向。

品质因子 Q 的表达式

$$Q = \frac{2\pi E}{\Delta E} \quad (2)$$

式中:

- E —周期内最大能量, J;
- ΔE —周期消耗的能量, J。

在模拟应用中, 通常使用式(3)计算品质因子 Q , 该值为实际地震资料与指数函数进行拟合得到

$$Q = av^b \quad (3)$$

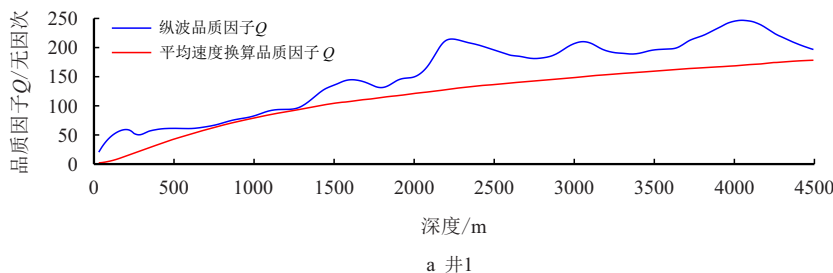
式中:

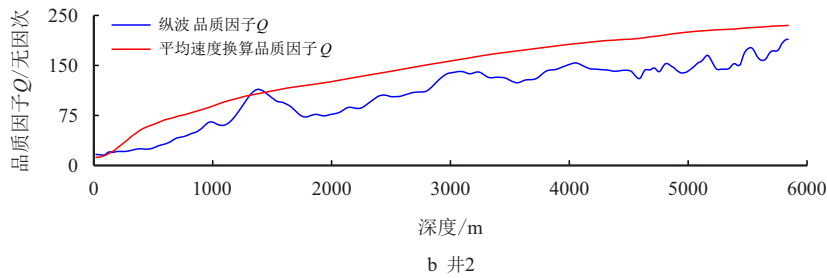
- v —速度, km/s;
- a, b —系数, 为经验常数^[23]。

根据式(1)可知, 黏声波方程为修正后的声波方程, 修正项反映地震波在传播过程中的衰减机制。当品质因子 Q 增大时, 黏滞加权项减小, 介质更接近于弹性介质; 当 Q 为无穷大时, 式(1)就为声波方程, 介质为完全弹性介质。

2.2 Q 场建模

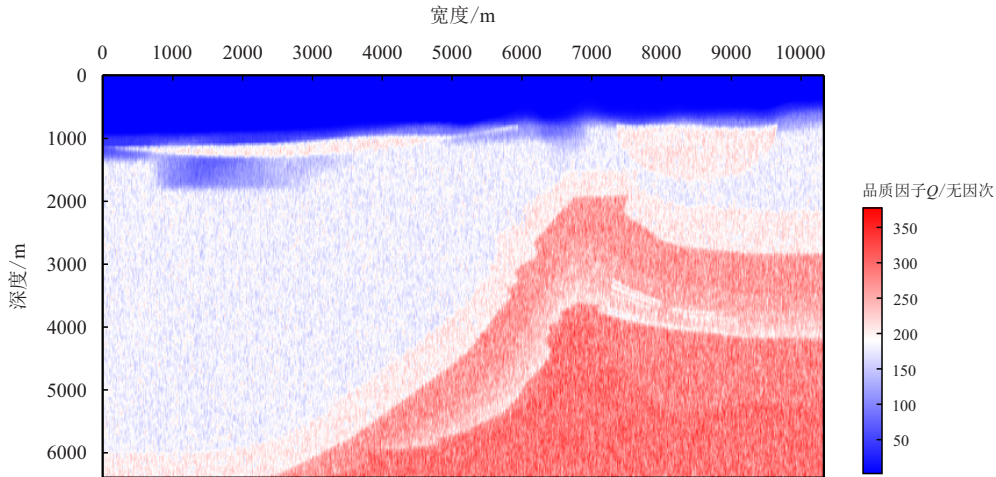
在黏声波正演中, 品质因子 Q 反映了地下介质对波场强度的吸收情况^[24-27], Q 的准确性会直接影响正演精度。常规经验式(3)以及经验系数计算得到的品质因子 Q 与实际相差过大, 本文利用 VSP 数据中的平均速度与 Q 对公式系数进行拟合求取。对工区内所有井进行拟合, 以拟合度为判定标准, 绝对系数低于 0.75 则舍去, 最后求取 a, b 的平均值, 得到该工区的系数为 $a=6.1, b=2.4$, 图 5 为利用修正后系数计算得到的品质因子 Q 。



图5 纵波品质因子 Q 与平均速度换算品质因子 Q 对比Fig. 5 Comparison between the longitudinal wave quality factor Q and the average velocity converted quality factor Q

据图5所示,通过平均速度换算的品质因子 Q 过于平滑,缺乏高频信息。在实际建立品质因子 Q 场时,利用井中实际品质因子 Q 与计算品质因

子 Q 的相对误差计算得到误差概率函数,并且在 Q 场建模时利用该误差概率函数补偿其高频信息,最终建立的品质因子 Q 模型切片如图6所示。

图6 品质因子 Q 模型切片Fig. 6 Slice of quality factor Q model

2.3 黏声波方程的频散研究

在正演模拟中,由于数值计算中通常使用离散化方法对波动方程进行数值求解,离散化会引入数值误差,使得数值解与精确解之间存在差异,当数值误差较大时,就会产生数值频散。式(4)、式(5)为判断频散条件的经验公式

$$\Delta h < \frac{c_{\min}}{5f_{\max}} \quad (4)$$

$$\Delta h < \frac{\lambda_{\min}}{5} \quad (5)$$

式中:

Δh —空间采样间隔, m;

c_{\min} —最小速度, m/s;

f_{\max} —最大主频, Hz;

λ_{\min} —最小波长, m。

通过式(4)、式(5),可知数值频散与空间采样间隔以及波长有关。一般来说,最小波长要大于5

倍的空间采样间隔,这样才能使得频散的影响忽略不计^[28]。但是由黏声波方程式(1)可知,黏滞项具有低通滤波效应,降低了地震波的主频。品质因子 Q 越小,低通滤波器的作用越强。根据频散条件,主频降低会增大右侧阈值,从而扩展空间采样间隔的允许值域,使得传统的频散约束条件在黏声介质中不再适用。

为了在保证正演模拟无频散的前提下尽可能减少计算时间,对模型品质因子 Q 、网格大小与频散间的关系进行了系统分析。三维地震正演计算量庞大,因此需尽可能增大网格尺寸以降低计算成本。然而,网格尺寸过大会引发频散现象,而常规的频散判据并不适用于黏声介质。因此,为确定合理的网格尺寸,需研究黏声波的频散极限条件。

为此,构建了一个两层三维速度模型(图7),其参数设置如下:第一层介质速度为 800 m/s(对

应于黄土层及模型的最低速度), 第二层速度为 1 800 m/s, 3 个空间的采样步长均为 10 m, 模型尺寸为 600 m×600 m×400 m。基于式(3)(系数 $a=14.0$ 、 $b=2.2$), 计算得到 800 m/s 对应的品质因子 Q 为 8.6, 第二层介质的品质因子 Q 为 51.0。为进一步分析品质因子 Q 对正演模拟的影响, 选取 $Q=15.0$ 和 $Q=20.0$ 进行对比实验, 并采用主频 25 Hz 的雷克子波作为震源进行正演计算, 结果如图 8 所示。

对比图 8 中的炮记录可见, 随着品质因子 Q 的增加, 黏声介质的行为逐渐向弹性介质逼近, 频散效应也随之增强。通过频散实验验证, 在网格尺寸为 10 m 的条件下, 利用式(3)计算所得品质因子 Q

能够满足正演模拟的精度要求。

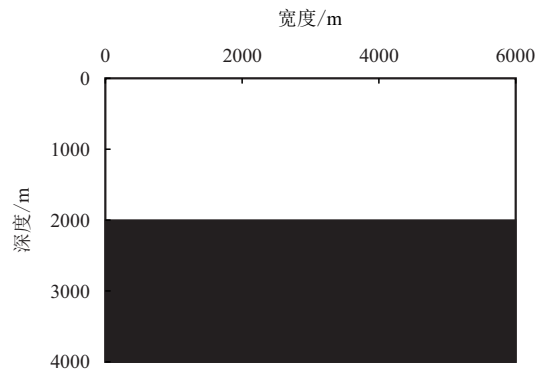


图 7 层状速度模型
Fig. 7 Laminated velocity model

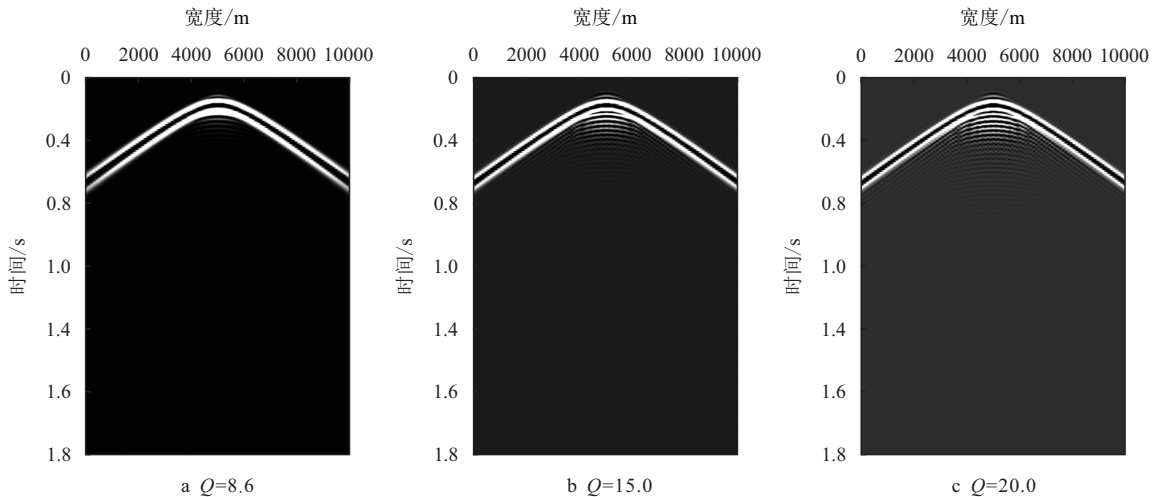


图 8 炮记录
Fig. 8 Shot record

2.4 正演模拟

通过上述方法建立的速度模型其最小速度为 800 m/s, 空气速度为 600 m/s, 通过式(3), 取系数 $a=6.1$ 、 $b=2.4$, 得到最小品质因子 Q 为 8.6。据频散分析与实际生成的面元需要, 保证模拟波场不频散前提下, 采取的网格大小为 10 m×10 m×10 m。针对上述模型以及参数进行三维黏声波数值模拟, 采用 120 L×2 S×720 R 观测系统(其中, L 代表接收线号、S 代表激发次数、R 代表每条线的接收器数量, 接收线距为 120 m、道距为 20 m、炮线距为 300 m、炮点距为 80 m、横向面元为 10 m、纵向面元为 40 m)。参数如下: 震源主频为 25 Hz 的雷克子波, 采样时间间隔为 0.002 s, 记录总时长为 6 s。

图 9 为炮点坐标(24 700 m, 22 000 m)处黏声波三维模拟切片, 图 10 为声波三维模拟切片。黏声波模拟中, 因品质因子 Q 对地震波有影响, 相当于在

正演模拟中增加了低通滤波器, 使地震主频降低, 从而大幅减少了频散在模拟过程中的影响, 炮记录的同相轴较为清楚。而在相同的模拟条件下, 声波模拟的频散十分严重, 同相轴几乎无法分辨。

为进一步研究波场传播规律, 以二维速度模型为例进行正演(图 4)。图 11 为炮点 $X=3\ 000$ m 处的波场传播图。因为在近地表处存在高速砾岩层, 波场在经过该层时, 发生反射形成上行的反射波, 并在地表处再次进行反射, 形成下行的多次波。该多次波会再次进入高速砾岩层, 形成与初至波前形状相似的次生波前(图 11a, 红色箭头为次生波前)。在砾岩层与近地表黄土层之间, 因砾岩层的起伏变化, 导致近地表波前产生散射, 再次形成次生波前(图 11b, 红色箭头为 3 个波前)。同理, 模型左侧也出现因砾岩层起伏导致的次生波前(图 11c)。随着地震波往深层传播, 地下高陡构造形成的反射波

与地表夹角过大(图 11d 红色箭头所示),若要接收该信号需加大接收范围;同时,次生波前形成的反射波(图 11d 黄色箭头)夹杂在初至波前之间传播,形成干扰波。最终得到炮点 $X=3\ 000\ \text{m}$ 处的炮记录

如图 12 所示。

在炮记录中,可以发现由于次生波场的原因,产生大量与反射波、直达波同相轴形状相似的多次波。同时,高陡构造的反射波接收不完全。

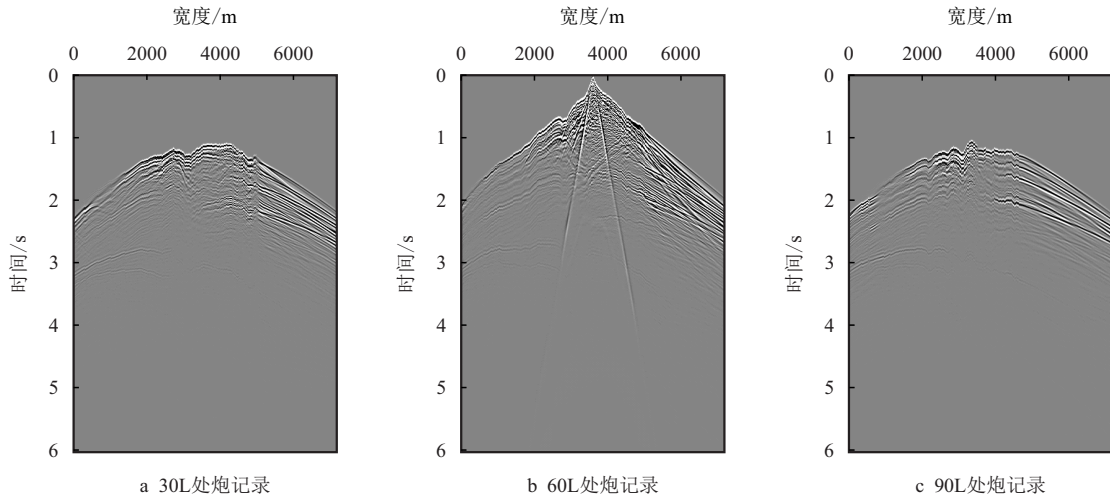


图 9 黏声波三维模拟切片
Fig. 9 Viscous acoustic 3D simulation section

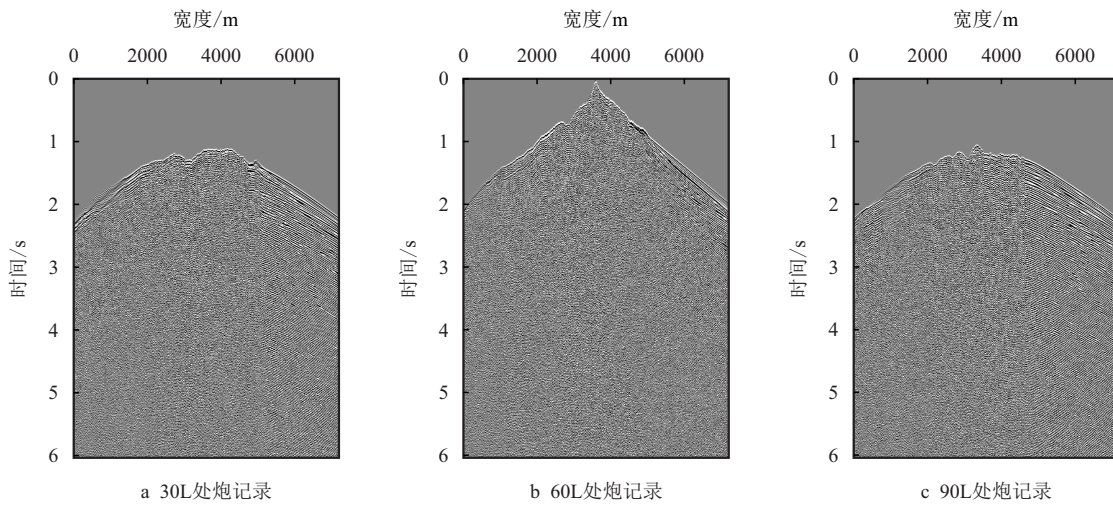
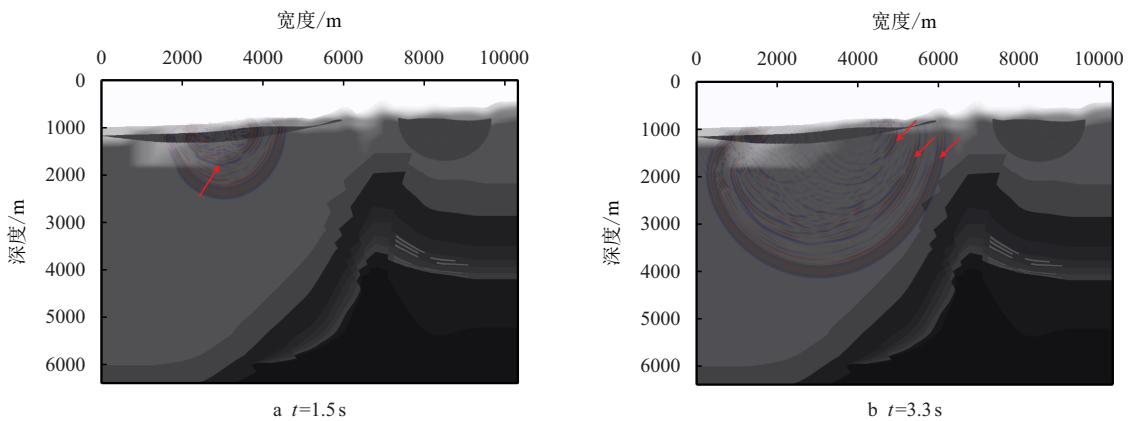


图 10 声波三维模拟切片
Fig. 10 Acoustic 3D simulation section



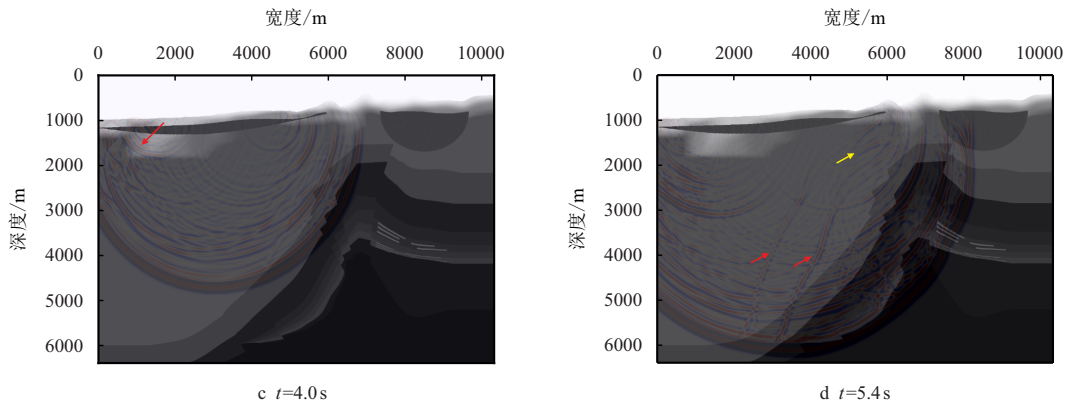


图 11 炮点坐标 $X=3\ 000\ \text{m}$ 的波场传播
 Fig. 11 Wave field propagation of source $X=3\ 000\ \text{m}$

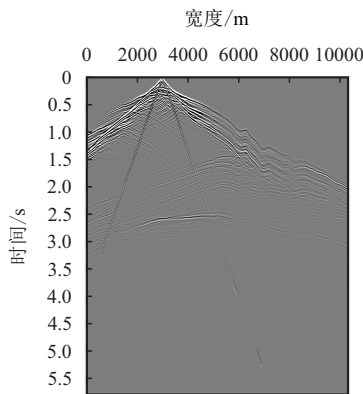


图 12 炮点坐标 $X=3\ 000\ \text{m}$ 的炮记录
 Fig. 12 Shot record of source $X=3\ 000\ \text{m}$

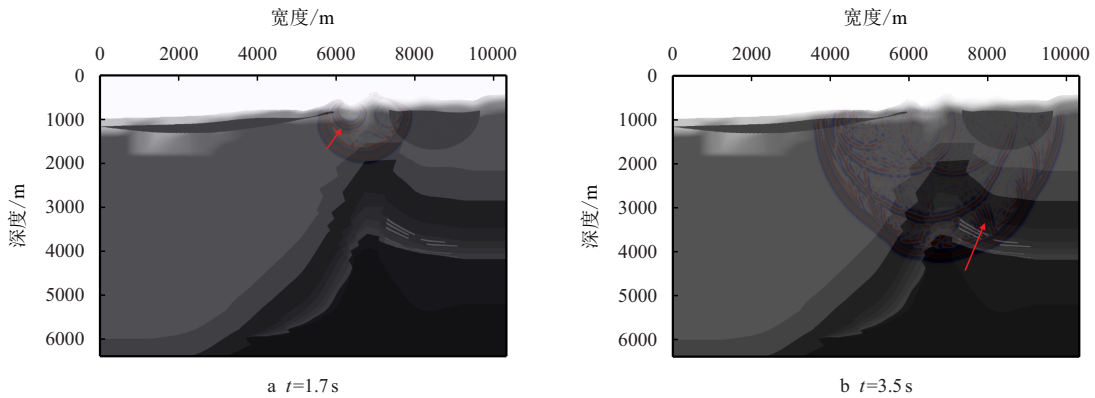


图 13 炮点坐标 $X=6\ 600\ \text{m}$ 的波场传播示意图
 Fig. 13 Wave field propagation of source $X=6\ 600\ \text{m}$

为研究剧烈起伏与平滑地表对炮记录信号的影响,对原始模型中的起伏地表进行平滑处理,以便分析两者对地震波传播及炮记录的影响。图 15 中绿色曲线代表原始的起伏地表,其地形起伏程度较大,具有明显的陡坡。同时,由于原始文件的采样间隔较大,导致高程文件呈现出明显的锯齿状特征,这种非平滑性不仅影响模型本身的物理真实性,还

会对后续的正演模拟产生不利影响。相较而言,图中红色线表示对原始起伏地表经过平滑处理后的结果,地表形态变得更加连续和平滑,局部变化也更符合实际地形变化的趋势,避免了剧烈不连续造成的数值误差。为了直观对比这两种地表形态对炮记录的影响,在 $X=2\ 500\ \text{m}$ 处选取相同位置进行正演模拟,炮记录如图 16 所示。

图 13 为炮点坐标 $X=6\ 600\ \text{m}$ 处的波场传播示意图。因起伏地表,在高程变化剧烈处产生绕射波并形成新的波前(图 13a,红色箭头所示)。在炮记录上,会产生与多次波类似的同相轴。当地震波传播到深层砂体处,产生的反射波(图 13b,红色箭头所示)由于反射角度过大,需加宽接收范围才能接收到砂体反射信息。

分析炮点坐标 $X=6\ 600\ \text{m}$ 处的波场传播规律(图 13)以及炮记录(图 14),因激发位置近地表处没有砾岩层的影响,波场更加简单,传播路径更为清晰,反映到炮记录中的信噪比更高,同相轴相对比较好好分辨。

会对后续的正演模拟产生不利影响。相较而言,图中红色线表示对原始起伏地表经过平滑处理后的结果,地表形态变得更加连续和平滑,局部变化也更符合实际地形变化的趋势,避免了剧烈不连续造成的数值误差。为了直观对比这两种地表形态对炮记录的影响,在 $X=2\ 500\ \text{m}$ 处选取相同位置进行正演模拟,炮记录如图 16 所示。

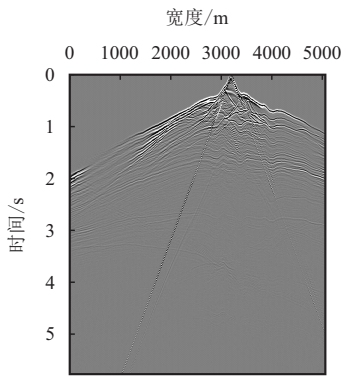


图 14 炮点坐标 X=6 600 m 的炮记录
Fig. 14 Shot record of source X=6 600 m

原始起伏地表下的正演结果同相轴被错断,并且由于起伏地表的锯齿导致地震波产生散射,在记录时间 0.5 s 附近出现大量散射噪声(图 16)。相比之下,在平滑起伏地表下,炮记录同相轴更为连续和清晰,反映出波场在传播过程中受地表干扰较小。同时,因地表平滑处理弱化了笛卡尔坐标系下地表非连续性所引发的散射干扰,有效抑制了散射噪声的产生。在波场快照中,近地表砾岩层会产生

多次波与散射波对炮记录的信噪比产生影响,为研究对比有无砾岩层条件下炮记录信号的区别,在原始速度模型上消除砾岩层进行正演对比。图 17 为不包含砾岩层的速度模型,在 X=1 800 m 处激发,得到如图 18 所示的炮记录,近地表有砾岩层的情况下炮记录有大量折射波(红框处)与多次波(黄框处),并且炮点位置附近的炮记录有大量的散射噪声。对比二者可以发现,在无砾岩的情况下,炮记录的信噪比更高。

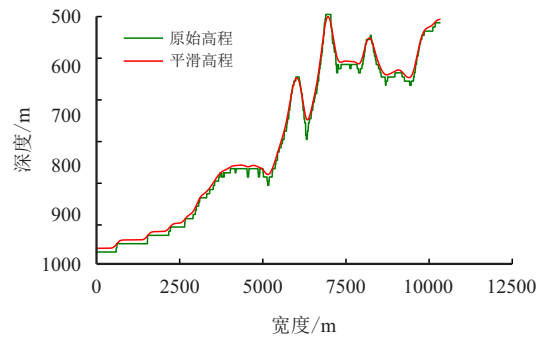


图 15 地表高程曲线
Fig. 15 Elevation curve of an undulating surface

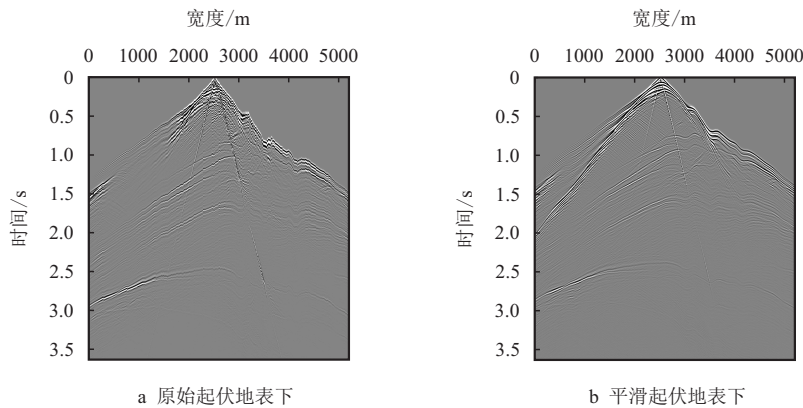


图 16 不同起伏地表条件下炮记录对比图
Fig. 16 Comparison of shot records under different undulating surface conditions

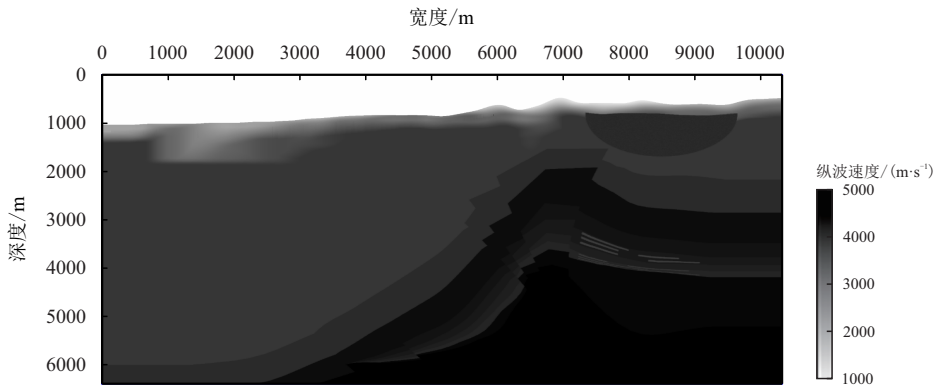


图 17 速度模型
Fig. 17 Velocity model

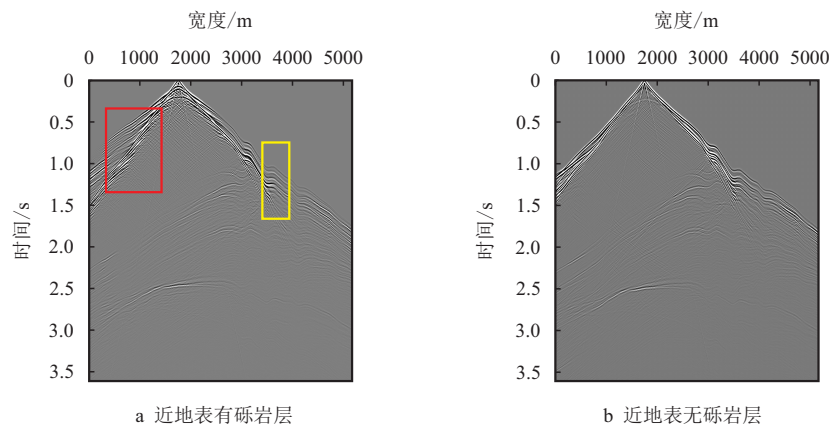


图 18 近地表砾岩层对地震炮记录的影响对比图

Fig. 18 Comparative analysis of seismic shot records in near-surface with/without conglomerate stratum

3 结 论

1) 在建立了代表塔西南地质特征的近地表速度模型和中深层速度模型后,根据平滑的地表高程界面,设置近地表模型和深层构造速度模型的融合区,并在该区域内进行纵向插值处理,以完全消除浅层—深层模型融合界面的影响。

2) 对于该地质模型,设计了主频为 25 Hz 的雷克子波作为震源,并使用采样时间间隔为 0.002 s、记录总时长为 6 s 的观测系统,炮记录结果表明,黏声波方程在目标区域具有良好的适用性,可以很好地模拟起伏的地表、反射波和地震波的衰减能量。

3) 在复杂地质条件下,地表的起伏会导致绕射波的产生,当地表高程差异较大时,这种现象尤为明显。此外,若在激发位置的近地表处存在高速砾岩层,则会产生大量次生波场,从而形成多次波,影响炮记录的信噪比。

4) 研究区地下存在高陡构造,为获得完整的波场信息,需要在大偏移距范围内进行激发,并加宽接收范围。

参考文献

- [1] 薛昭,董良国,李晓波,等.起伏地表弹性波传播的间断 Galerkin 有限元数值模拟方法[J].地球物理学报,2014,57(4):1209–1223.
XUE Zhao, DONG Liangguo, LI Xiaobo, et al. Discontinuous Galerkin finite-element method for elastic wave modeling including surface topography[J]. Geophysics (in Chinese), 2014, 57(4): 1209–1223.
- [2] 于明浩,巩向博,万晓杰.复杂地表相控震源正演模拟与照明分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(6):2034–2041. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.-20220025
YU Minghao, GONG Xiangbo, WAN Xiaojie. Seismic simulation and illumination analysis of phased-array vibrator system on complex surface[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 2034–2041. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220025
- [3] 和芬芬,吕公河,邸志欣,等.复杂山地三维波动方程正演模拟及波场传播特征分析[C].海口:2022年中国石油物探学术年会,2022.
HE Fenfen, LÜ Gonghe, DI Zhixin, et al. Forward simulation of complex mountain three-dimensional wave equation and analysis of wave field propagation characteristics[C]. Haikou: Proceedings of the 2022 China Petroleum Geophysical Annual Conference, 2022.
- [4] 吕景峰,陈学强,钟海,等.塔西南巨厚黄土塬静校正方法及实例[C].成都:中国石油学会2019年物探技术研讨会,2019.
LÜ Jingfeng, CHEN Xueqiang, ZHONG Hai, et al. Static correction method and case study of the giant thick loess tables in southwest Tarim Basin[C]. Chengdu: 2019 Geophysical Prospecting Technology Seminar of China Petroleum Society, 2019.
- [5] 王春明,师骏,王棣,等.塔西南山前三维模型正演及波场分析[C].成都:中国石油学会2021年物探技术研讨会,2021.
WANG Chunming, SHI Jun, WANG Di, et al. 3D model forward modeling and wave field analysis of the southern Tarim Basin[C]. Chengdu: 2021 Geophysical Prospecting Technology Seminar of China Petroleum Society, 2021.
- [6] 袁光银,张晓斌,陈江力,等.波动方程正演技术在巨厚黄土地区地震勘探中的研究与应用[C].北京:SPG/SEG 2014年国际地球物理会议,2014.
YUAN Guangyin, ZHANG Xiaobin, CHEN Jiangli, et al. Wave equation forward modeling technology in the thick

- loess area, the research and application of seismic exploration[C]. Beijing: SPG/SEG 2014 International Geophysical Conference, 2014.
- [7] 岳勇, 田景春, 赵应权. 塔里木盆地西南部皮山北新1井角砾岩的地层归属, 成因及油气勘探意义[J]. 地球科学, 2019, 44(11): 3894–3909. doi: 10.3799/dqkx.-2018.250
YUE Yong, TIAN Jingchun, ZHAO Yingquan. Stratigraphic attribution, genesis and petroleum exploration significance of breccia in Well Pishan Beixin 1, Southwest Tarim Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3894–3909. doi: 10.3799/dqkx.2018.250
- [8] 崔海峰, 刘军, 田雷, 等. 塔西南拗陷早加里东期正断层活动及油气意义[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(2): 384–390. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.02.-024
CUI Haifeng, LIU Jun, TIAN Lei, et al. Early Caledonian normal fault activity and its oil-gas significance in southwest Tarim Depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(2): 384–390. doi: 10.13810/j.cnki.issn.-1000-7210.2016.02.024
- [9] 潘俊尧. 正演模拟在柯克亚卡拉塔尔组油气预测应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
PAN Junyao. Application of Forward Modeling in Oil and Gas Prediction of Kirkaya Karatar Group[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2022.
- [10] 陈猛. 塔西南黄土区低降速带地震信号衰减规律[C]. 本溪: 中国石油学会 2008 年物探技术研讨会, 2008.
CHEN Meng. Attenuation law of seismic signal in low deceleration zone in loess area of southwest Tarim Basin[C]. Benxi: Geophysical Exploration Technology Seminar of China Petroleum Society, 2008.
- [11] 崔志强, 胥值礼, 李飞. 塔西南高精度航磁油气地质构造调查[J]. 物探与化探, 2021, 45(4): 846–858. doi: 10.11720/wtyht.2021.1455
CUI Zhiqiang, XU Zhili, LI Fei. High-precision aeromagnetic petroleum geological structure investigation in southwest Tarim Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(4): 846–858. doi: 10.11720/wtyht.-2021.1455
- [12] 崔志强, 胥值礼, 李飞, 等. 基于高精度航空磁测的塔西南拗陷深部地质构造研究[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6): 1238–1250. doi: 10.12134/j.dzykt.2020.06.012
CUI Zhiqiang, XU Zhili, LI Fei, et al. Research on the deep geological structure of the southwest depression of the tower based on high-precision aeromagnetic survey[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(6): 1238–1250. doi: 10.12134/j.dzykt.2020.06.012
- [13] 陈建国, 周旭, 孔德政, 等. 塔西南黄土塬区地震采集方法探讨[C]. 成都: 中国石油学会 2019 年物探技术研讨会论文集, 2019.
CHEN Jianguo, ZHOU Xu, KONG Dezheng, et al. Discussion on seismic acquisition methods in the loess tableless area of southwest Tarim Basin[C]. Chengdu: 2019 Geophysical Exploration Technology Seminar of China Petroleum Society, 2019.
- [14] 王静彬, 高志前, 康志宏, 等. 塔里木盆地塔西南拗陷和田凹陷普司格组烃源岩沉积环境及有机地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(11): 1723–1734. doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2017.04.011
WANG Jingbin, GAO Zhiqian, KANG Zhihong, et al. The Sedimentary environment and geochemical characteristics of the source rocks in the Pusige Formation in Hetian Sag, southwestern Tarim Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(11): 1723–1734. doi: 10.11764/j.issn.-1672-1926.2017.04.011
- [15] 何万利, 杨华臣, 张建中. 使用回折波走时数据的起伏地表速度建模方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(9): 64–70. doi: 10.16441/j.cnki.hdx.-20200338
HE Wanli, YANG Huachen, ZHANG Jianzhong. Modeling method of undulating surface velocity using reversed-wave travel time data[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2021, 51(9): 64–70. doi: 10.16441/j.cnki.hdx.20200338
- [16] 毛先宇, 郑建军, 许自强. 三维正演技术在塔中某井区的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 34(13): 128. doi: 10.3969/j.issn.1673-4076.2014.13.124
MAO Xianyu, ZHENG Jianjun, XU Ziqiang. Application of 3D forward modeling technology in a well area in Tazhong[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2014, 34(13): 128. doi: 10.3969/j.issn.1673-4076.2014.13.124
- [17] CHRISTIAN J T. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization[J]. Earth-Science Reviews, 1996, 40(3): 299–301. doi: 10.1016/0012-8252-(95)00067-4
- [18] HOULDING S. The application of new 3-D computer modelling techniques to mining[J]. Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, 1992, 354: 303–325.
- [19] 李鸿. 复杂地表复杂构造三维建模及正演模拟研究——以塔西南地区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
LI Hong. Three-dimensional modeling and forward modeling of complex structures on complex surface: A case study of southwest Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017.
- [20] 孙统. 塔里木盆地塔西南拗陷山前断裂带构造解析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
SUN Tong. Structural analysis of the foreland fault zone in southwest depression, Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [21] 黄文宇, 潘长春, 于双, 等. 塔里木盆地塔西南拗陷柯

- 东构造带甫沙 4 井原油来源及充注过程[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(11): 1836–1847. doi: 10.11764/j-issn.1672-1926.2022.07.009
- HUANG Wenyu, PAN Changchun, YU Shuang, et al. Source and charging process of crude oil in Well Fusha 4, Kedong Tectonic belt, southwest depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(11): 1836–1847. doi: 10.11764/j-issn.1672-1926.2022.07.009
- [22] 郑轩, 宗兆云, 付亚群, 等. 海域油气盖层叠前地震反演预测方法及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 2128–2141. doi: 10.13278/j.cnki-jjuese.20240255
- ZHENG Xuan, ZONG Zhaoyun, FU Yaqun, et al. Pre-stack seismic inversion prediction method and application for marine oil and gas cap rocks[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 2128–2141. doi: 10.13278/j.cnki-jjuese.20240255
- [23] 李庆忠. 走向精确勘探的道路: 高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- LI Qingzhong. The path to precision exploration: Engineering anatomy of a high-resolution seismic exploration system[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [24] LIANG Kai, CAO Danping, HE Binghong, et al. Characterization for wave equations in viscoelastic media based on the constant Q property[J]. Applied Geophysics, 2020, 17(4): 561–575.
- [25] 王智亮. 三维粘滞声波方程有限差分算法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- WANG Zhiliang. Research on finite difference algorithms for three-dimensional viscous acoustic wave equation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [26] 谭明, 龚伟, 廖茂辉, 等. 基于频变衰减弹性阻抗的纵、横波品质因子反演方法[J]. 断块油气田, 2024, 31(3): 494–502. doi: 10.6056/dkyqt202403017
- TAN Ming, GONG Wei, LIAO Maohui, et al. Inversion method of quality factor of P-wave and S-wave based on frequency-dependent attenuation elastic impedance[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(3): 494–502. doi: 10.6056/dkyqt202403017
- [27] 徐凯驰, 吕景峰, 裴广平, 等. 近地表连续介质区 Q 值调查应用研究[J]. 非常规油气, 2024, 11(5): 1–9. doi: 10.19901/j.fcgyq.2024.05.01
- XU Kaichi, LÜ Jingfeng, PEI Guangping, et al. Investigation and application of Q -value in near-surface continuous medium area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(5):

1–9. doi: 10.19901/j.fcgyq.2024.05.01

- [28] SEI A. A family of numerical schemes for the computation of elastic waves[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1995, 16(4): 898–916.

作者简介



裴广平, 1985 年生, 男, 满族, 辽宁抚顺人, 工程师, 硕士, 主要从事地震资料采集、解释等方面的研究工作。E-mail: peigp-tlm@petrochina.com.cn



沈天晶, 1996 年生, 男, 汉族, 重庆合川人, 博士, 主要从事地震资料处理、解释方面的研究。E-mail: tianjing.shen@qq.com



彭更新, 1966 年生, 男, 汉族, 陕西渭南人, 高级工程师, 硕士, 主要从事地震资料处理、解释方面的研究工作。E-mail: penggx-tlm@petrochina.com.cn



姜泽磊, 1996 年生, 男, 汉族, 四川成都人, 博士, 主要从事地震资料采集、建模方面的研究。E-mail: xiaolei217217@163.com



陈飞旭, 1988 年生, 男, 汉族, 陕西榆林人, 高级工程师, 硕士, 主要从事地震资料处理、采集方面的研究工作。E-mail: chenfx-tlm@petrochina.com.cn

编辑: 张云云

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>